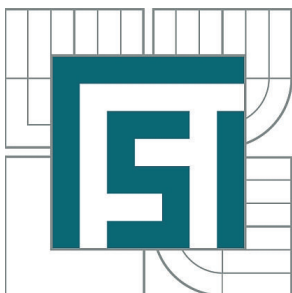


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

NOVÉ METODY DOKONČOVÁNÍ VNĚJŠÍCH ROTAČNÍCH PLOCH.

NEW METHODS FOR OUTER ROTARY SURFACES FINISHING.

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

LUDĚK BARTOŠÍK

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. OSKAR ZEMČÍK, CSc.

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Luděk Bartošík

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Nové metody dokončování vnějších rotačních ploch.

v anglickém jazyce:

New methods for outer rotary surfaces finishing.

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

1. Rešerše literatury k danému tématu.
2. Popis technologií a metod dokončování vnějších rotačních ploch.
3. Porovnání jednotlivých metod dokončování.
4. Závěr a doporučení pro strojírenskou praxi.

Cíle bakalářské práce:

Studie metod zaměřená na dokončovací metody vnějších rotačních ploch s doporučením využití pro strojírenskou praxi.

Seznam odborné literatury:

1. ZEMČÍK, O. Technologická příprava výroby. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002. 158 s. ISBN 80-214-2219-X.
2. ZEMČÍK, O. Nástroje a přípravky pro obrábění. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. 193 s. ISBN 80-214-2336-6
3. KÖNIG, W. Fertigungsverfahren band 1,2,3. 4. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH, 1999. 416 s. ISBN 3-18-401054-6
4. Firemní podklady dle dalšího zpřesnění a určení (Sandvik Coromant, Gühring, Fette, Pramet, Mitsubishi, Iscar, Seco, apod.
5. REICHARD, A. Fertigungstechnik 1,2. 10. Aufl. Hamburg: Handwerk und technik, 1993. 420 s. ISBN 3-582-02311-7

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Oskar Zemčík, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/2010.

V Brně, dne 23.11.2009

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá technologiemi dokončování vnějších rotačních ploch, popisuje jednotlivé metody, jejich výhody a nevýhody a vliv na výslednou kvalitu povrchu. Obsahuje starší i nové technologie a také konvenční a nekonvenční metody. Je zde přehled nejrozšířenějších a nejznámějších dokončovacích technologií v současném strojírenství.

Klíčová slova

Dokončování, Rotační plochy, Broušení, Lapování, Soustružení

ABSTRACT

This bachelor thesis deal with technologies of finishing rotate surfaces, describe individual methods, their advantages and disadvantages and results on quality of surface. It describe older and new technologies and too conventional and unconventional methods. Here is overview of most used and best know technologies in present engineering.

Key words

Finishing, Rotate Surface, Grinding, Lapping, Turning

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BARTOŠÍK, Luděk. *Název: Nové metody dokončování vnějších rotačních ploch.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojírenského inženýrství, 2010. s.51, Ing. Oskar Zemčík, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Nové metody dokončování vnějších rotačních ploch vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

.....
Jméno a příjmení bakaláře

Poděkování

Děkuji tímto Ing. Oskaru Zemčíkovi, CSc. za pomoc, cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

OBSAH

ABSTRAKT	4
OBSAH	7
ÚVOD	9
1 DOKONČOVÁNÍ	10
2 BROUŠENÍ	11
2.1 Základní charakteristika	11
2.2 Metody broušení	12
2.2.1 Axiální broušení	12
2.2.2 Hloubkové broušení	13
2.2.3 Radiální broušení	14
2.2.4 Bezhroté průběžné broušení	14
2.2.5 Bezhroté zapichovací broušení	15
2.3 Kinematika broušení	16
2.4 Brusné nástroje	17
2.4.1 Značení klasických brusných kotoučů	17
2.4.2 Kotouče ze supertvrdých materiálů	17
2.5 Brusky	19
2.5.1 Hrotové brusky	20
2.5.2 Bezhroté brusky	20
3 LAPOVÁNÍ	21
3.1 Charakteristika	21
3.2 Lapovací nástroje	21
3.3 Druhy lapování	23
3.3.1 Mechanické lapování	23
3.3.2 Chemicko-mechanické lapování	23
3.3.3 Elektrochemické lapování	23
3.4 Lapovací stroje	23
4 SUPERFINIŠOVÁNÍ	25
4.1 Charakteristika	25
4.2 Superfinišovací nástroje	26
4.3 Superfinišovací stroje	27
5 JEMNÉ SOUSTRUŽENÍ	28
5.1 Základní charakteristika	28
5.2 Kinematika soustružení	29
5.3 Nástroje pro jemné soustružení	30
5.3.1 Slinuté karbidy	31
5.3.2 Řezná keramika	31
5.3.3 Polykrystalický diamant, KNB	31
5.4 Soustruhy	33
6 LEŠTĚNÍ	34
6.1 Princip leštění	34
6.1.1 Mechanické leštění	34
6.1.2 Chemické leštění	34
6.1.3 Elektrochemické leštění	34
6.2 Leštící nástroje	35
6.3 Leštící stroje	36

7 VÁLEČKOVÁNÍ	38
7.1 Princip	38
7.1.1 <i>Statické válečkování</i>	39
7.1.2 <i>Dynamické válečkování</i>	40
7.2 Nástroje	40
7.3 Stroje	40
8 HLAZENÍ	42
8.1 Princip hlazení	42
8.2 Stroje a nástroje	42
9 OTRYSKÁVÁNÍ, KULIČKOVÁNÍ, BALOTINOVÁNÍ	43
9.1 Princip metody	43
9.1.1 <i>Otryskávání</i>	43
9.1.2 <i>Kuličkování</i>	43
9.1.3 <i>Balotinování</i>	43
9.2 Stroje	43
10 NEKONVENČNÍ TECHNOLOGIE	45
10.1 Princip	45
10.2 Elektroerozivní obrábění	45
ZÁVĚR	48
RESUME	49
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	50
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ	51

ÚVOD

Pro správnou funkci většiny strojních součástí je nutno zajistit mnoho podmínek. S tímto se musí počítat už od stádia projekce, návrhu a konstrukce. Kromě výběru vhodného materiálu a rozměrů je také nutné vybrat správnou technologii výroby. Obzvláště na funkční plochy je kladen velký důraz. Musí splňovat určité tvarové, rozměrové a jakostní požadavky, které nelze splnit klasickými obráběcími metodami, proto je nutné vybrat správnou dokončovací operaci.

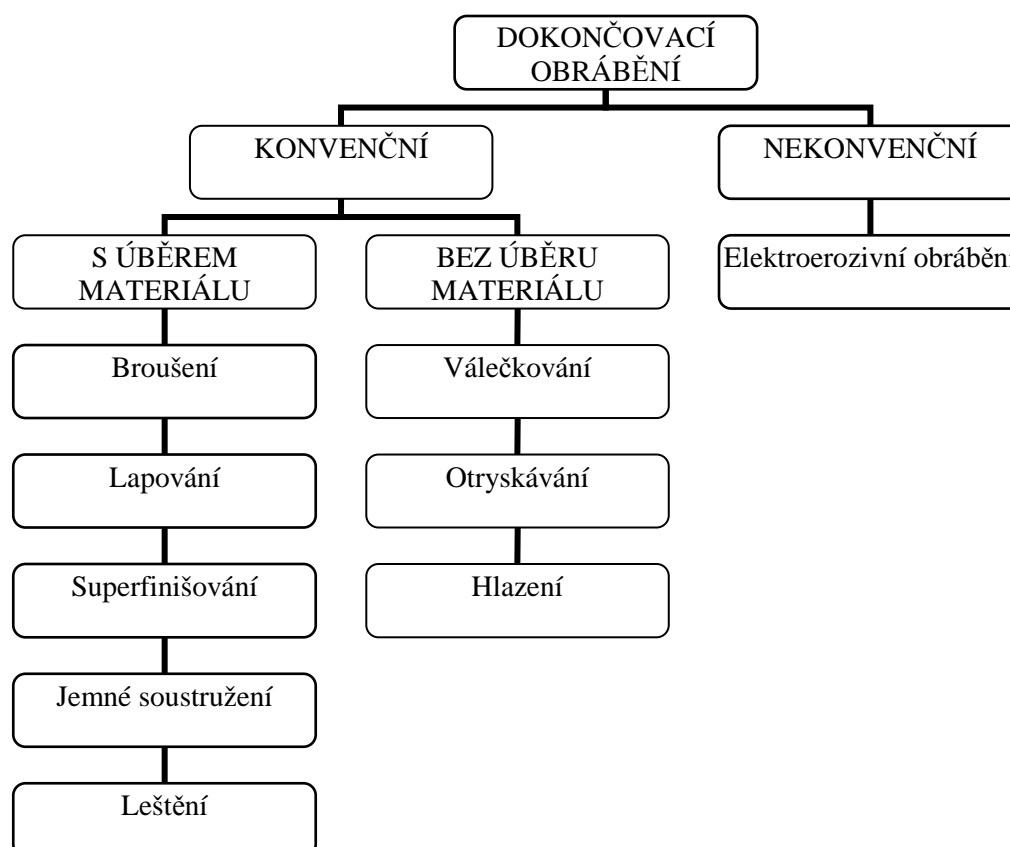
V současné době existuje celá řada dokončovacích technologií. Některé jsou už starší a dobře zavedené, jiné perspektivní technologie jsou teprve zaváděny do provozu. U některých součástí je dokonce nutné použít některou specifickou metodu například z důvodu zpevnění povrchu.

Práce se zabývá technologiemi dokončování vnějších rotačních ploch, jak staršími a hojně používanými, tak novými moderními metodami.

V současné době nejsou kladeny požadavky pouze na drsnost a tvarovou přesnost, ale také na vzhled výrobku. Proto obsahuje také několik metod zaměřených na zlepšení vzhledu povrchu.

1 DOKONČOVÁNÍ

Dokončování je závěrečná operace při obrábění. Provádí se za účelem získání předepsané jakosti a kvality povrchu z důvodů funkčních, mechanických nebo estetických. Dokončováním se dosáhne zlepšení jakosti povrchu, zpřesnění rozměrů a tvarů, vylepšení vzhledu (lesk), u některých metod také k výraznému zlepšení mechanických vlastností materiálu (pevnost, tvrdost, otěruvzdornost, odolnost vůči korozi). Pokud potřebujeme použít některou z metod dokončovacího obrábění, je nutné tomu přizpůsobit předchozí operaci a nechat přídavek na dokončování; jeho velikost závisí na použité metodě. Obvyklá přesnost dokončovacích operací je IT6-7 s drsnostmi $Ra=0,2-1,6$.



Obr.1-1 Rozdělení dokončovacího obrábění

2 BROUŠENÍ

2.1 Základní charakteristika

Je to obrábění mnohobřítým nástrojem s nedefinovanou geometrií vytvořeným ze zrn brusiva, která jsou spojena pojivem. Je to nejstarší metoda obrábění, stará několik tisíc let, sloužila k výrobě zbraní a pomůcek. V současnosti je to nejrozšířenější metoda dokončovacího obrábění

Hlavní charakteristiky broušení:

V důsledku nedefinované geometrie brusných zrn a jejich nahodilého uspořádání v kotouči je úběr třísky jednotlivými zrny nepravidelný. Díky tomu je při posunu obrobku odebíráno malé množství materiálu i když se vzdálenost mezi kotoučem a materiálem nezměnila. Tento jev je nazýván vyjiskřování. Ovlivňuje ho také tepelné namáhání a z toho vyplývající tepelná roztažnost materiálu

Jednotlivé zrna mají velké záporné úhly čela, které nejsou stejné

Zrna nejsou v kotouči pevně upevněna, proto nejsou schopna přenášet velké řezné síly. V důsledku slabého upevnění se při broušení samovolně uvolňují; toto je žádoucí vlastnost, protože se kotouč sám ostří

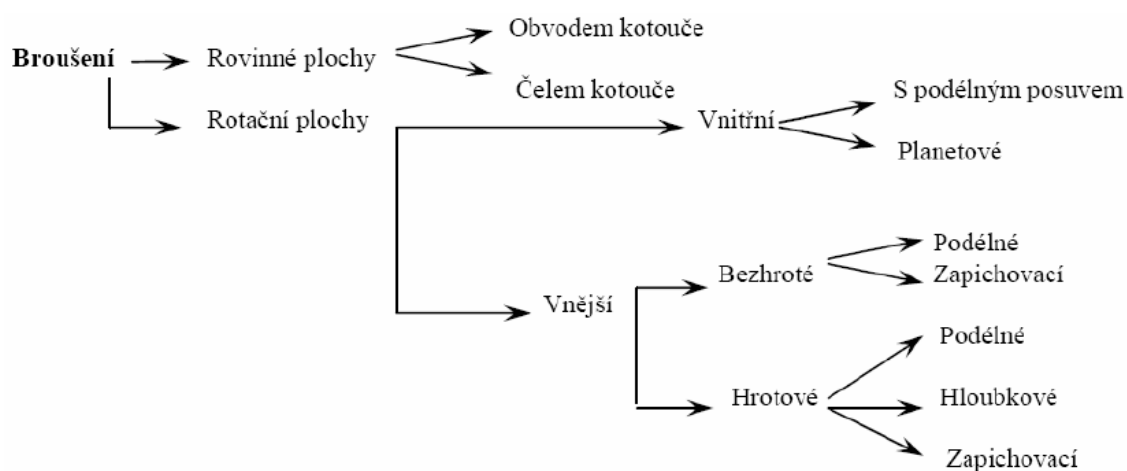
Třísky mají malý průřez, který je proměnný, proto se některé v důsledku vysokých deformací a tření roztaví nebo shoří.

U broušení dosahujeme vysokých hodnot řezných rychlostí, které dosahují hodnot 30 až 100 m/s




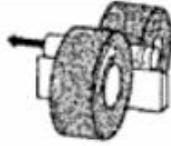
Vzniká velké množství tepla, takže je nutné obrobek vydatně chladit. Velké tepelné zatížení povrchu má totiž nepříznivé vlastnosti; v povrchové vrstvě vznikají zbytková tahová napětí, které mají vliv na spolehlivost a životnost hotové součásti.

Nástroj ztrácí svou řezivost v důsledku otupování jednotlivých zrn brusiva a také kvůli zanášení pórů kotouče třískami. Proto je občas nutné obnovit jejich řezivost a původní tvar orovnávači

2.2 Metody broušení



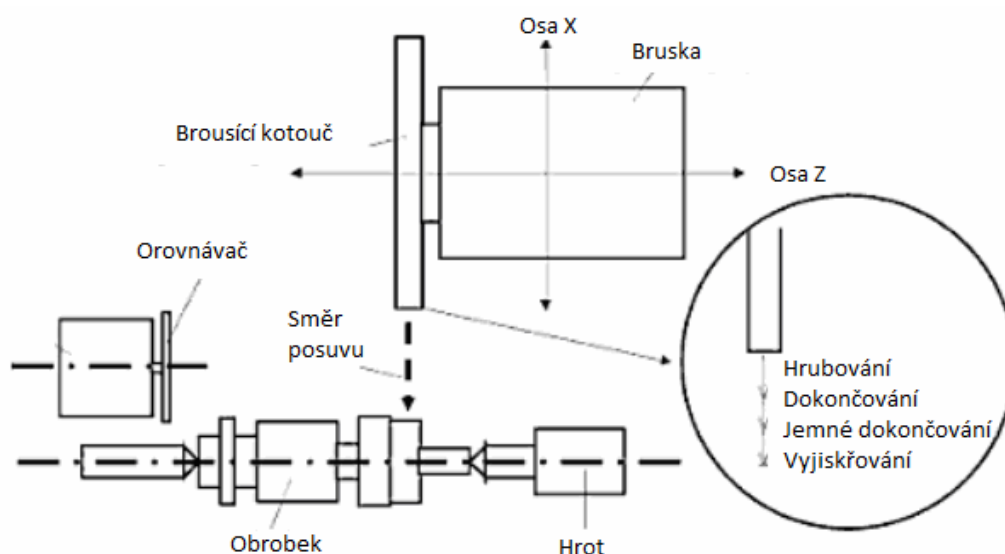
Dále se budeme zabývat pouze broušením vnějších rotačních ploch

Zapichovací broušení mezi hroty		Axiální broušení mezi hroty	Broušení mezi hroty
			
Zapichovací bezhroté broušení		Axiální bezhroté broušení	Bezhroté broušení
			
Radiální posuv		Axiální posuv	

Obr.2-1 Metody broušení vnějších rotačních ploch ³

2.2.1 Axiální broušení

Broušení s axiálním (podélným) posuvem se používá hlavně pro broušení dlouhých rotačních součástí válcového nebo kuželového tvaru. Obrobek je upevněn mezi hroty, dlouhé součásti je možné podepřít lunetou. Posuvný pohyb může konat jak samotný obrobek, tak nástroj; záleží pouze na konstrukci stroje. Úběr materiálu zajišťuje radiální posuv kotouče, který se na každý zdvih, případně dvojdvih stolu posune o hodnotu pracovního záběru.

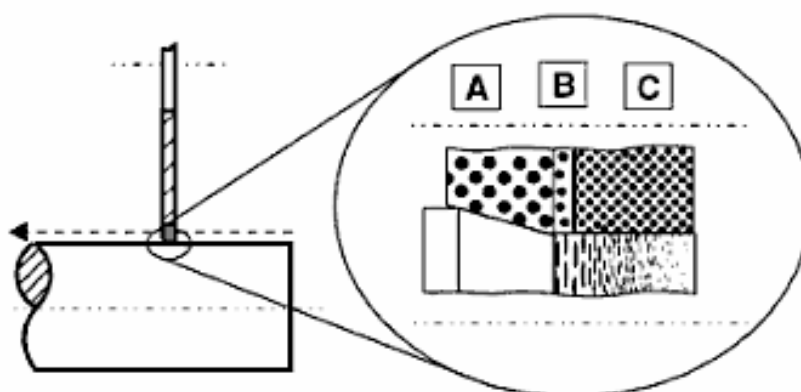
Obr.2-2 Princip axiálního broušení³

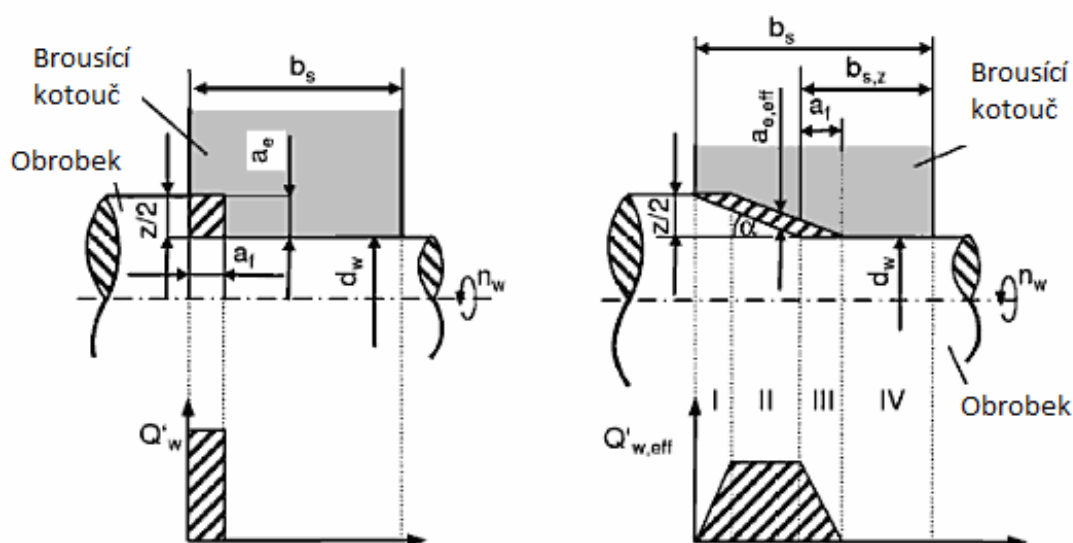
2.2.2 Hlubkové broušení

Tato metoda je prakticky zefektivnění axiálního broušení. Používá se v případech, kdy máme pouze malý přídavek na broušení, který odebereme na jeden průběh; tzn. že kotouč nastavíme rovnou na konečný rozměr. Je nutné použít malé hodnoty axiálního posuvu.

Výhodou oproti axiálnímu broušení je vysoká produktivita a z toho vyplývající vysoké výkony. Dále je materiál odebírán pouze malou částí kotouče, zbytek pouze vyjiskřuje, sice už neubírá téměř žádný materiál, ale dále vylepšuje výslednou kvalitu povrchu.

Pro zlepšení podmínek pro hrubovací část se na kotouči může vytvořit kuželové zkosení nebo je kotouč vyroben stupňovitě; toto uspořádání se používá pro velké úběry materiálu. Řezné rychlosti se používají stejné jako u axiálního broušení ($v_c=25-35\text{m/s}$; $v_w=15-20\text{m/min}$).

Obr.2-3 Části kotouče: A-Hrubovací, B-Dokončovací, C-Vyjiskřovací³

Obr.2-4 Úpravy tvaru kotouče a jejich vliv na tvorbu třísky³

2.2.3 Radiální broušení

Další variace na axiální broušení. Kotouč je v tomto případě širší než broušená plocha ($b > l_w$). Z praktických důvodů nebývá broušená plocha delší než 350mm, obrobek musí být také dostatečně tuhý. Řezná rychlost a obvodová rychlost obrobku se používá stejná jako u axiálního broušení ($v_c = 25-35 \text{ m/s}$; $v_w = 15-20 \text{ m/min}$). Posuv je pouze radiální a to u hrubování $f = 0,0025-0,0075 \text{ mm/otáčku obrobku}$ a dokončovací $f = 0,001-0,005 \text{ mm/ot}$.

Radiální broušení dosahuje oproti axiálnímu broušení o 40-80% lepších výkonů. Obrobky se upínají mezi hroty, tenkostěnné součásti jsou upínány do rozpínacích trnů.

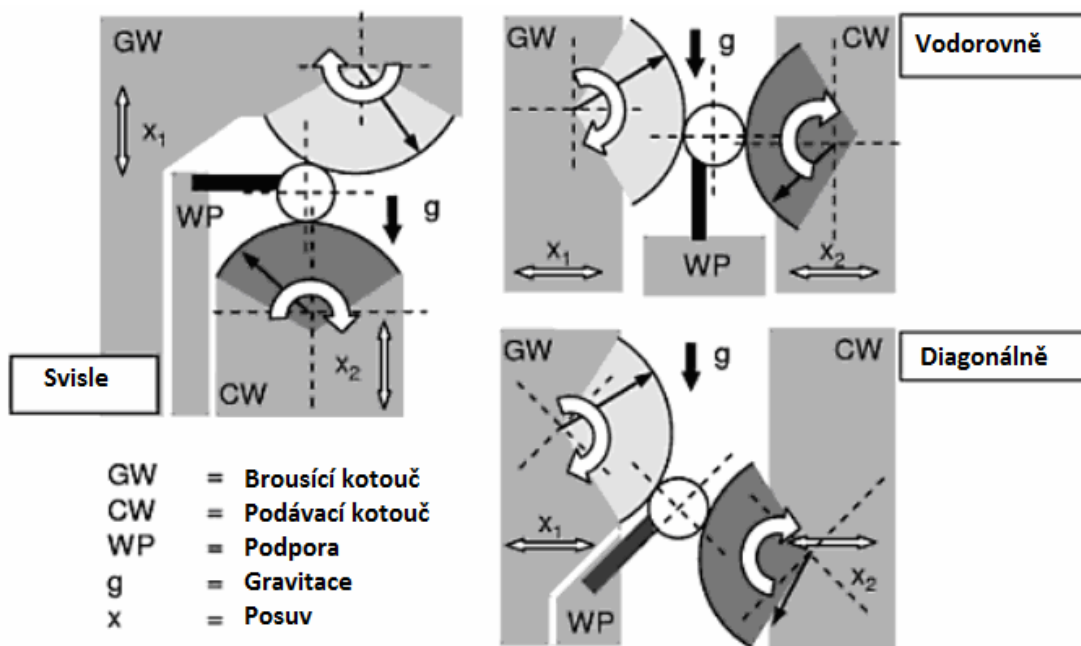
2.2.4 Bezhraté průběžné broušení

Používá se pro broušení hladkých válcových součástí. Bruska má dva kotouče, mezi které se vkládá obrobek; jeden je brousící, obvykle je větší, druhý je podávací. Obvodová rychlost obrobku je stejná jako podávacího kotouče. Osa obrobku je oproti osám kotoučů asi o 5 až 30mm výš a součást je podepřena vodící lištou z kalené oceli.

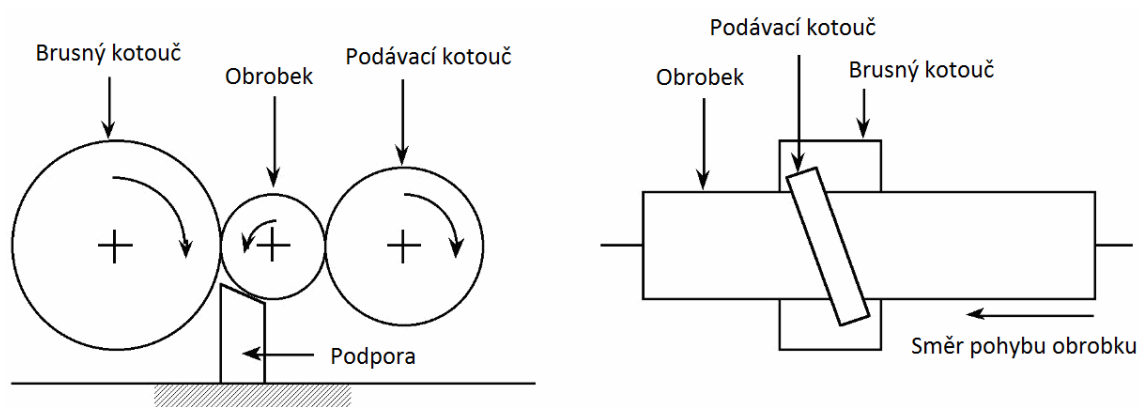
Axiální posuv je realizován natočením podávacího kotouče; rychlost se potom rozkládá na 2 složky - axiální posuvovou a rotační. Axiální rychlost se reguluje změnou natočení kotouče, pohybuje se v hodnotách 1500 - 4500 mm/min. Obvodová rychlost kotouče je stejná jako u ostatních druhů broušení - $v_c = 30-35 \text{ m/s}$; obvodová rychlost obrobku je $v_w = 18-45 \text{ m/min}$; doporučená hodnota pracovního záběru $a = 0,005-0,3 \text{ mm}$.

2.2.5 Bezhraté zapichovací broušení

Brousí se jím součásti s tvarovým osazením (nákrůžek, různé průměry,...), které nemají středící důlky. Oba kotouče brusky mají osy nastaveny rovnoběžně. Obrobek se vkládá mezi kotouče shora i dorazu. Broušení probíhá většinou na dva úběry, pro dokončovací se nechává přídavek okolo 0,03-0,05mm.



Obr.2-5 Bezhraté broušení³



Obr.2-6 Princip pohybu součásti

2.3 Kinematika broušení

Řezná rychlost:

$$v_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{60 \cdot 1000} [m \cdot s^{-1}] \quad (2-1)$$

$d [mm]$ - Průměr kotouče

$n [min^{-1}]$ - Otáčky kotouče

Řezná síla:

$$F_c = 25 \cdot v_w^{0,6} \cdot f_a^{0,6} \cdot a_e^{0,5} [N] \quad (2-2)$$

$v_w [m \cdot min^{-1}]$ - Obvodová rychlost obrobku

$f_a [mm]$ - Axiální posuv stolu na jednu otáčku

$a_e [mm]$ - Pracovní záběr

nebo

$$F_c = k_c \cdot A_D [N] \quad (2-3)$$

$k_c [MPa]$ - Měrná řezná síla

$A_D [mm^2]$ - Průřez třísky

Hodnoty k_c pro oceli se pohybují mezi 10 000 (hrubování) až 35 000 (jemné broušení)

$$A_D = f_a \cdot h_{eq} = \frac{10^3 \cdot v_{fa} \cdot h_{eq}}{n_w} \quad (2-4)$$

$f_a [mm]$ - axiální posuv stolu brusky na jednu otáčku

$h_{eq} [mm]$ - ekvivalentní tloušťka broušení

$v_{fa} [m \cdot min^{-1}]$ - axiální rychlost posuvu

$n_w [min^{-1}]$ - otáčky obrobku

Jednotkový strojní čas:

$$t_{AS} = \frac{l_a}{f_a \cdot n_w} \cdot \frac{p}{2 \cdot f_r} = \frac{l_a \cdot p}{2 \cdot 10^3 \cdot v_{fa} \cdot f_r} [min] \quad (2-5)$$

$l_a = l_{na} + l_w + l_{pa} [mm]$ dráha pohybu stolu brusky v axiálním směru

$l_{na} = 3mm$ délka náběhu v axiálním směru

$l_{pa} = l_{na} + b_s / 2 [mm]$ délka přeběhu v axiálním směru

$b_s [mm]$ šířka brousícího kotouče

$l_w [mm]$ délka obrobku

$f_a [mm]$ axiální posuv stolu brusky na jednu otáčku obrobku

$n_w [min^{-1}]$ frekvence otáčení obrobku

p [mm] přídavek na broušení

f_r [mm] radiální posuv stolu brusky na jeden axiální zdvih stolu

v_{fa} [$m \cdot min^{-1}$] axiální rychlost posuvu stolu brusky

2.4 Brousící nástroje

2.4.1 Značení klasických brusných kotoučů

tab.2.1 Příklad značení kotoučů ¹

1	2	3	4	5	6	7	8
1	300 x 50 x 76	A	36	L	5	V	35 m s⁻¹
Rozměry (2): vnější průměr - 300 mm, šířka - 50 mm, průměr upínací díry - 76 mm							

1-tvar: Viz obr. 2-7

2-rozměry: Udává základní rozměry - průměr a šířku, další udávané rozměry závisí na tvaru kotouče - obr...

3-materiál: Materiál brusných zrn, jeho volba záleží na broušeném materiálu. Nejčastěji používaný je oxid hlinitý (Al_2O_3)- oceli; a karbid křemíku (SiC) - litiny, slitiny lehkých kovů

4-zrnitost: Volí se podle požadované drsnosti obráběného povrchu a jeho materiálu. Čím hladší povrch požadujeme, tím vyšší zrnitost zvolíme, protože zrnitost je definována jako počet ok v sítu na 1 palec, kterým zrno propadne. Tady je rozdíl oproti původní ČSN normě, která udávala zrnitost jako rozměr zrna v μm . Pro hrubování a obrábění měkkých materiálů se používají hrubší kotouče.

5-tvrdost: S tvrdostí nemá tento údaj nic společného, u brusných kotoučů udává odolnost vůči vydrolování zrn. U měkkých kotoučů se zrno vydroluje rychleji než u tvrdých. Čím tvrdší materiál obrábíme, tím měkkší kotouč zvolíme, protože brusná zrna se rychle otupí a je potřeba je rychle nahradit.

6-struktura: Vzdálenost mezi jednotlivými zrny, vyjadřuje poměr brusiva a pojiva, pro tvrdé materiály používáme hutné kotouče, pro houževnaté pórovité

7-pojivo: Spojuje brusná zrna do jednoho celku. Nejpoužívanější je keramické pojivo, je univerzální, ale kotouč jsou křehké a náchylné k poškození

2.4.2 Kotouče ze supertvrdých materiálů

Za supertvrde materiály považujeme diamant a kubický nitrid boru. Základní těleso brusného kotouče je většinou vyrobeno ze slitiny hliníku, na něm je kovovým, případně pryskyřicovým pojivem nanesena tenká vrstva brusiva. Kotouče z diamantu se nedají pro svou vysokou afinitu k železu

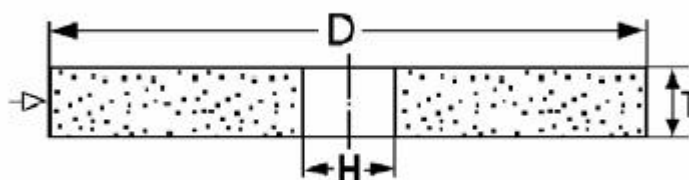
používat na broušení ocelí. Na značení kotoučů ze supertvrdých materiálů neexistuje závazná norma značení.

Tab.2.2 Příklad značení kotouče s diamantovými brusnými zrnny ¹

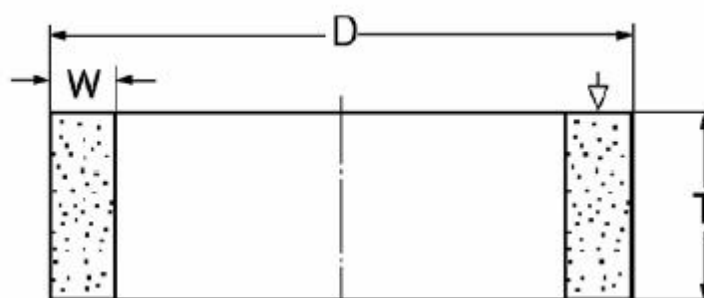
1	2	3	4	5	6	7
1 - 150 - 10/2	B - VIII	D 107	K 100	10000/min		

1 – typ (tvar) kotouče, 2 – rozměry kotouče, 3 – pojivo, 4 – druh brusiva, 5 – zrnitost brusiva, 6 – koncentrace brusiva, 7 – maximální otáčky

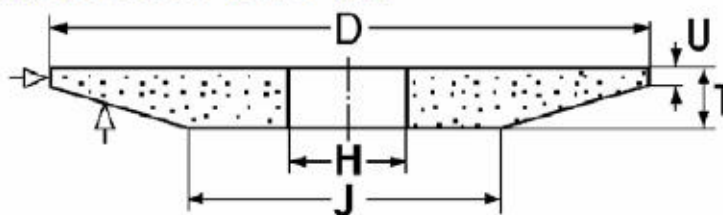
- plochý D x T x H



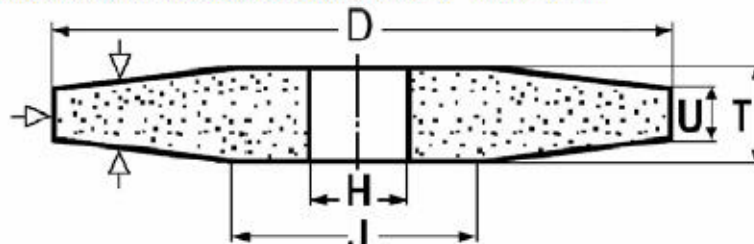
- prstencový D x T x W



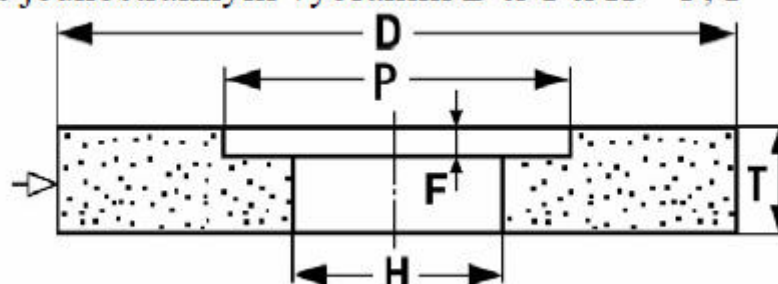
- kuželové D/J x T/U x H



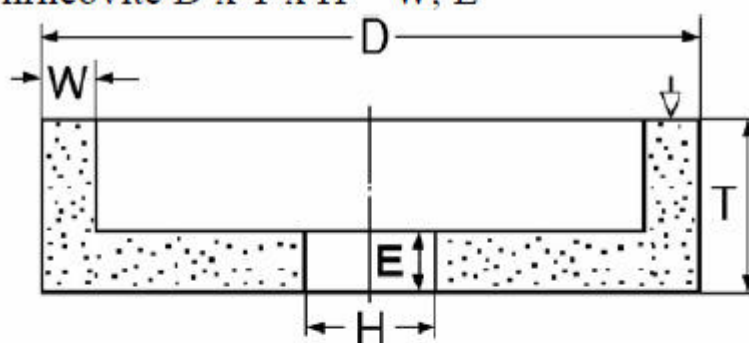
- oboustranně kuželové D/J x T/U x H



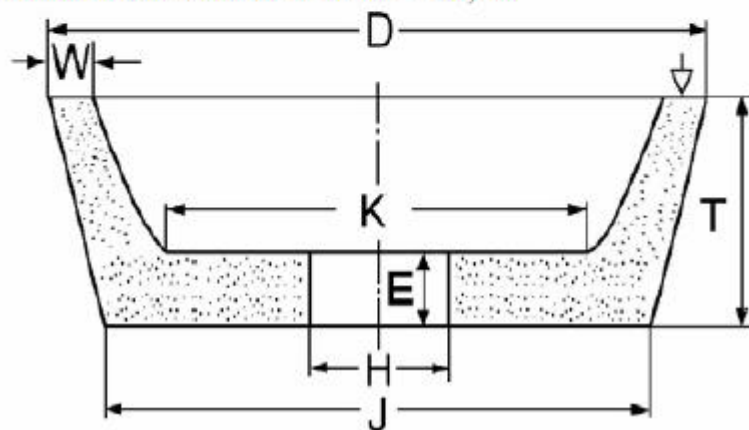
- s jednostranným vybráním $D \times T \times H - P, F$



- hrncovité $D \times T \times H - W, E$



- miskovité $D/J \times T \times H - W, E$



Obr.2-7 Tvary brusných kotoučů ¹

2.5 Brusky

Rozdělení brusek:

- | | |
|------------------|------------------------------|
| - rotační brusky | - hrotové brusky |
| | - bezhroté brusky |
| - rovinné brusky | - vodorovné |
| | - svislé |
| - brusky na díry | - s rotačním pohybem obrobku |

-s planetovým pohybem kotouče

-nástrojové brusky -univerzální
-speciální

Tato práce je zaměřena na obrábění vnějších rotačních ploch, proto se budeme dále zabývat pouze hrotovými a bezhrotými bruskami

2.5.1 Hrotové brusky

Využívají se k broušení rotačních ploch u obrobků upnutých mezi hroty. Nejčastější jsou univerzální hrotové brusky, které umožňují výrobu válcových a kuželových ploch.

2.5.2 Bezhroté brusky

Nemají zařízení pro upínání obrobku. Mají dva vřeteníky - jeden s brousícím kotoučem a druhý s podávacím kotoučem, který má menší průměr. Vřeteníky mají samostatné náhony, přičemž brousící kotouč má konstantní otáčky. Broušený průměr se nastavuje pomocí přestavování podávacího kotouče. Natačením podávacího vřeteníku se nastavuje mimoběžnost os, která vyvoluje axiální pohyb obrobku při průběžném broušení. Jejich využití je výhodné v sériové výrobě kde mohou fungovat automaticky.



Obr.2-8 Bezhrotá NC bruska ⁷

3 LAPOVÁNÍ

3.1 Charakteristika

Při lapování se dosahuje nejnižších hodnot drsnosti a nejlepších hodnot rozměrové přesnosti. Lze ho použít jak pro obrábění vnějších válcových ploch, tak také pro dokončování rovinných, vnitřních válcových i tvarových ploch. Lapují se součásti, které musí být přesné - jako například měřidla, součásti motorů,... Lze ho aplikovat na jakýkoli druh materiálu. Je možná jak strojový pohon, tak při kusové výrobě může být ruční metodou.

Obrábění je realizováno volnými zrny brusiva, které je ve formě pasty nebo roztoku přiváděno mezi obráběný povrch a nástroj. V případě použití měkkého nástroje mohou být brusná zrna také zamačkána do jeho povrchu.

Lapování rozdělujeme na hrubovací, jemné a velmi jemné. Při hrubovacím lapování dochází k odřezávání vrcholů a nerovností vlivem velkého množství zrn brusiva. Při velmi jemném lapování se princip změní, hlavní část převezme vliv plastické deformace povrchové vrstvy obrobku.

Největší nevýhodou lapování je jeho velmi nízká produktivita, velká pracnost a vysoké náklady oproti ostatním druhům obrábění. Proto, pokud je to možné, je výhodnější ho nahradit jinými druhy dokončovacích operací.

Tab.3.1 Dosažitelná přesnost u lapování ¹

Lapování	Přesnost rozměrů IT		Drsnost povrchu Ra [μm]	
	střední	rozsah	střední	rozsah
hrubovací	4	3 ÷ 5	0,2	0,16 ÷ 0,40
jemné	2	1 ÷ 3	0,1	0,08 ÷ 0,16
velmi jemné			0,03	0,01 ÷ 0,04

3.2 Lapovací nástroje

Nástroje pro lapování mají negativní tvar obráběné plochy, nosným médiem je buď pasta nebo kapalina (většinou petrolej s přísadou oleje). Vyrábějí se nejčastěji z jemnozrné feritické nebo perlitické litiny, měkké oceli, plastických hmot,... Pro velmi jemné lapování je také možné použít nástroje z kalené oceli. Pro ruční lapování vnějších válcových ploch se používají lapovací prstence.

Strojní lapování vnějších rotačních ploch se provádí bezhrotým průběžným nebo zapichovacím způsobem. Nástroji jsou kotouče s brusivem v keramické vazbě.

Tab.3.2 Brusiva pro lapování ¹

Lapovaný materiál	Brusivo
Oceli	umělý korund - Al_2O_3
Litiny, keramika, sklo	karbid křemíku - SiC
Zvlášť tvrdé materiály (SK, RO)	karbid boru - B_4C , kubický nitrid boru, diamant
Měkké materiály	oxid železitý - Fe_2O_3 oxid chromitý - Cr_2O_3 vídeňské vápno - CaMgCO_3 hydroxid železitý - $\text{Fe}(\text{OH})_3$

tab.3.3 Lapovací pasty ¹

Druh brusiva		Al_2O_3		SiC	Cr_2O_3		
Zrnitost		1200 - 70	150 - 36	180 - 150	36	100	220
Obsah složek [%]	brusivo	70	50 ÷ 70	60	81	76	74
	kyselina olejová	20	20 ÷ 27				2
	kyselina stearová	8	8 ÷ 17		10		
	tuhá kyselina křemičitá				2		1,8
	zmýdelněný tuk			38	5	10	
	bikarbonát sodný						0,2
	petrolej	2	2 ÷ 6		2		

Tab.3.4 Řezné podmínky pro lapování ¹

Typ plochy a lapovaný materiál	Ope- race	Brusivo		Přídavek	Tlak	Řezná rychlost
		Druh	Zrnitost	[μm]	p _k [MPa]	v _c [m min ⁻¹]
Rovinné plochy, kalené oceli	1	Al ₂ O ₃	25	30 ÷ 60	0,13 ÷ 0,15	30 ÷ 60
	2		8	10 ÷ 15	0,12 ÷ 0,15	15 ÷ 30
	3		4	5 ÷ 7	0,10 ÷ 0,12	10 ÷ 15
			3	1 ÷ 3	0,08 ÷ 0,10	7 ÷ 10
Vnější válcové plo- chy, bronz	1	Cr ₂ O ₃	40	20 ÷ 30	0,02 ÷ 0,03	20 ÷ 30
	2		8	10 ÷ 15	0,010 ÷ 0,015	10 ÷ 15
	3		4	3 ÷ 5	0,010 ÷ 0,015	
1 - hrubovací lapování, 2 - jemné lapování, 3 - velmi jemné lapování						

1 - hrubovací lapování, 2 - jemné lapování, 3 - velmi jemné lapování

3.3 Druhy lapování

3.3.1 *Mechanické lapování*

Základní způsob lapování, odebrání materiálu je realizováno čistě vlivem řezných hran brusiva. Jako brusivo jsou používány zrna běžných brusných materiálů, je možné použít také umělý diamant, který má výborné vlastnosti.

3.3.2 *Chemicko-mechanické lapování*

Novější způsob lapování, odebrání materiálu je usnadněno narušením povrchu obrobku, tato poškozená vrstva je odstraněna zrny brusiva. Tato metoda je mnohem efektivnější, k dosažení požadované přesnosti a jakosti povrchu stačí pár opakování. Nástroje musí být proti aktivním látkám odolné. Tato metoda se efektivně využívá na dokončování součástí z oceli, měděných a hliníkových slitin. Dosahuje se vysokých stupňů přesnosti

3.3.3 *Elektro-chemicko-mechanické lapování*

Jedná se o další nadstavbu chemicko-mechanického lapování; je postaveno na principu elektrolytického obrábění. Povrch obrobku je rozrušen působením chemických látek a elektrického proudu, tato narušená vrstva je mechanicky odstraněna. Proces se několikrát opakuje až do dosažení požadovaného povrchu. Tato metoda je vysoce efektivní a rychlá, dosahuje se výborných parametrů obrobené plochy.

3.4 Lapovací stroje

Lapovací stroje jsou vyráběny jako univerzální, které umožňují lapování jak rovinných, tak rotačních ploch, nebo speciální, určené pro lapování specifických ploch, například ozubených kol, kuliček do valivých ložisek, klikových hřídelů motorů,...

Stroje pro lapování vnějších rotačních ploch (také pro rovinné) jsou konstruovány jako dvoukotoučové se svislými osami. Jeden z kotoučů je uložen výkyvně, aby bylo možné kotouče správně ustavit. Mezi kotouči jsou vloženy unášecí desky, které zajišťují rovnoměrné opotřebení kotoučů - zajišťují pohyb obrobků po celé ploše.

Lapovací stroje jsou také použitelné pro leštění; celý princip je prakticky stejný, jediný rozdíl je v použití jiných kotoučů a brusiva.

Obr.3-1 Lapovací stroj ⁷

Axiální drážky



Křížené drážky



Spirální drážky



Segmentový disk

Obr.3-2 Lapovací kotouče ⁸

4 SUPERFINIŠOVÁNÍ

4.1 Charakteristika

Superfinišování je vysoce produktivní metoda dokončovacího obrábění. Umožňuje dokončování vnějších a vnitřních válcových ploch, rovinných ploch a také tvarových ploch. Dosahuje vysoké přesnosti a jakosti povrchu. Je možné ho použít na dokončování součástí z kalených i nekalených ocelí, litin, plastů a slitin neželezných kovů.

Je to prakticky speciální metoda broušení, úběr materiálu je realizován abrazivním účinkem superfinišovacích kamenů, které jsou vytvořeny z velmi jemných zrn. Superfinišování má jednu zvláštnost, proces obrábění se po dosažení požadovaných parametrů povrchu sám zastaví, i když řezný pohyb neustane. Je to způsobeno snižováním tlaku, kterým kameny působí na povrch obrobku. Postupným odřezáváním vrcholů nerovností se zvětšuje kontaktní plocha => snižuje se tlak; po dosažení určitého tlaku ztratí zrna svou řeznou schopnost - proces se zastaví. Pro další pokračování je nutné zvýšit přítlačnou sílu - zvýší se tlak - proces se znovu spustí.

Tab.4-1 Dosahovaná přesnost superfinišování ¹

Superfinišování	Přesnost rozměrů IT		Drsnost povrchu Ra [μm]	
	střední	rozsah	střední	rozsah
dokončovací	4	3 ÷ 5	0,2	0,05 ÷ 0,40
jemné	3	2 ÷ 4	0,05	0,025 ÷ 0,100

Řezný pohyb je složen z rotačního pohybu obrobku a kmitavého pohybu superfinišovacího nástroje. Obvodová rychlost obrobku se obvykle pohybuje okolo $v_c=10\div80\text{m/s}$; frekvence kmitání nástroje je $f=500\div3000/\text{min}$. Zdvih nástroje H je $0,1\div10\text{mm}$. Posuv v_f se pohybuje v rozmezí $2\div15\text{m/min}$; určí se podle vztahu $v_f = f \cdot H / 1000$

Při úhlu $\alpha=40\div60^\circ$ dosahujeme nejrychlejšího úběru. Při úhlech $< 40^\circ$ se sníží řezivost, ale povrch získá lesklý vzhled; při hrubovacím je povrch matný. Jako procesní kapalina je většinou používán petrolej, který je možné smíchat s minerálními oleji, případně je možné použít samotný olej. Viskozita kapaliny ovlivňuje vhodnost jejího použití; pro větší úběry materiálu je lepší použít kapalinu o nízké viskozitě - petrolej, pro jemné superfinišování se spíše používají oleje, které mají viskozitu větší.

Před superfinišováním bývá zařazeno broušení nebo jemné soustružení, protože dosahují lepší produktivity, ale neumožňují dosažení stejné jakosti povrchu.

Tab. Řezné podmínky a přídavky ¹

Drsnost povrchu Ra [μm]		Přídavek [μm]	Operace	Úhel křížení stop 2α [°]	Poměr v_w/v_k
požadovaná	výchozí				
0,16	1,6	10 ÷ 12	1	80 ÷ 110	0,8 ÷ 1,2
0,08	0,8	5 ÷ 8	2	40 ÷ 70	1,5 ÷ 2,5
0,04	0,4	4 ÷ 5	3	20 ÷ 40	3 ÷ 12
0,02	0,2	2 ÷ 3	4	< 20	12 ÷ 28

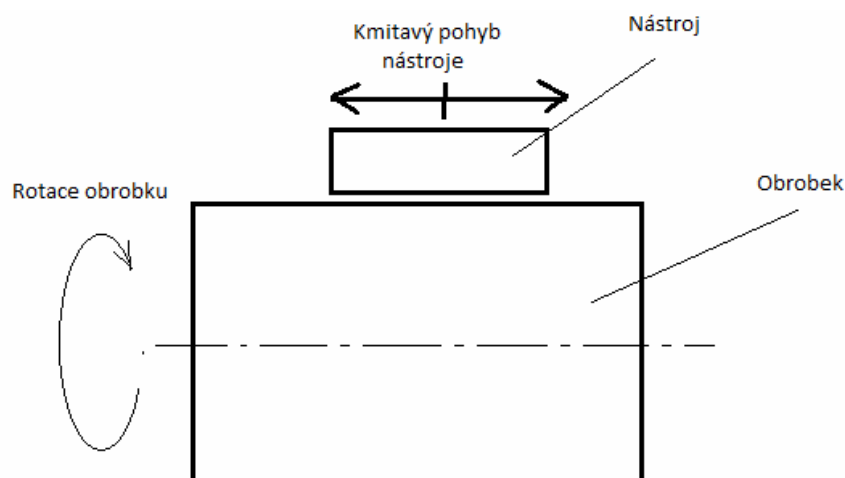
1,2 - hrubovací fáze superfinišování, 3,4 - jemné superfinišování (volí se podle výchozí drsnosti)

4.2 Superfinišovací nástroje

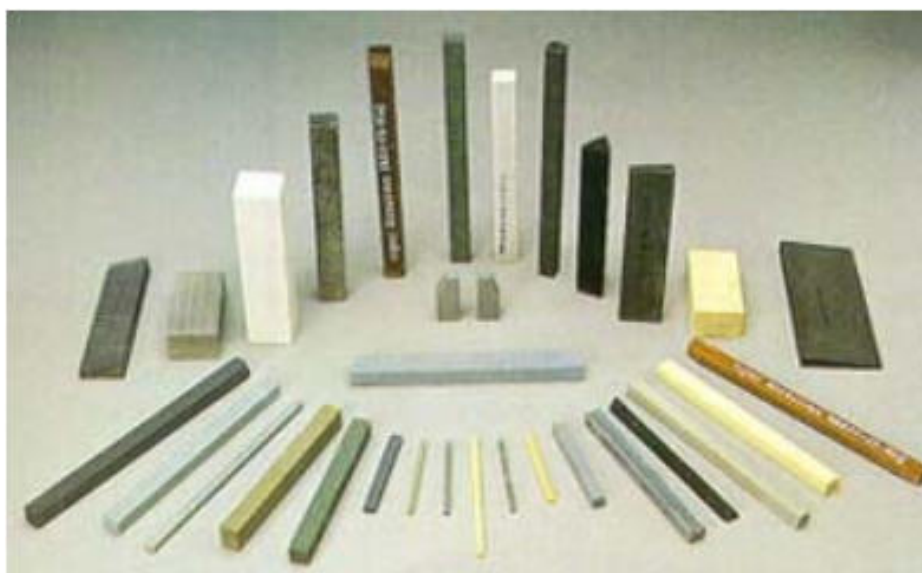
Nástroji jsou superfinišovací kameny. Ty jsou vyráběny z Al_2O_3 s keramickou vazbou pro obrábění ocelí, z SiC - litiny, neželezné kovy a jejich slitiny. Pro obrábění legovaných ocelí jsou určeny kameny z kubického nitridu boru. Superfinišovat jdou i nástroje ze slinutých karbidů, na to jsou určeny nástroje z umělého diamantu. Superfinišovací kameny jsou do hlav upevňovány mechanicky

4.3 Superfinišovací stroje

Specializované stroje existují jako jednovřetenové nebo vícevřetenové. Tyto stroje jsou určeny do sériové výroby. Pro kusovou výrobu je možné použít přídatná zařízení s vlastním pohonem oscilačního pohybu nástroje. Tato zařízení se upínají na suporty brusek nebo hrotových soustruhů.



Obr.4-1 Princip superfinišování

Obr.4-2 Superfinašovací stroj⁵Obr.4-3 Superfinašovací kameny⁹

5 JEMNÉ SOUSTRUŽENÍ

5.1 Základní charakteristika

Ačkoli je soustružení relativně starší metoda obrábění, nebylo možné jím dosahovat vysokých jakostí povrchu. To se změnilo až s příchodem moderních CNC soustruhů a obráběcích center. Ty nabízejí vyšší přesnost a větší tuhost soustavy stroj-nástroj-obrobek než klasické stroje.

Tab.5.1 Obvyklé hodnoty posuvu a řezných rychlostí pro soustružení⁵
(hodnoty jsou orientační, přesné závisí na konkrétních řezných podmínkách)

Materiál obrobku	Posuv za otáčku f (mm)								
	hrubování			Na čisto			Jemné soustr.		
	$f > 0,3$			$f = 0,3 - 0,05$			$f < 0,05$		
	Materiál nástroje			Materiál nástroje			Materiál nástroje		
	RO	SK	KM	RO	SK	KM	RO	SK	KM
Uhlíková ocel do 800 MPa	15	60	-	20	90	150	60	150	300
	až	až	-	až	až	až	až	až	až
	40	140	-	60	180	400	100	250	600
Uhlíková ocel nad 800 MPa	10	40	-	15	70	120	50	120	350
	až	až	-	až	až	až	až	až	až
	35	100	-	50	140	300	80	200	500
Legované oceli	8	35	-	15	45	-	30	60	-
	až	až	-	až	až		až	až	
	35	110	-	50	160	-	60	150	-
Šedá litina	15	30	--	20	60	120	-	-	-
	až	až	-	až	až	až			
	30	90	-	50	100	200	-	-	-
Slitiny hliníku	20	80	-	40	120	150	80	150	300
	až	až	-	až	až	až	až	až	až
	80	200	-	100	300	600	120	350	800

Tab.5.2 Dosahované přesnosti a drsnosti⁵

Druh práce	Přesnost IT	Drsnost R_a	Nástroj
Hrubování	11 až 14	12,5 až 100	RO,SK
Na čisto	9 až 11	1,6 až 12,5	RO,SK
Jemné soustružení	7 až 8	0,4 až 1,6	SK
	5 až 6	0,2 až 0,8	diamant

5.2 Kinematika soustružení

Hlavní řezný pohyb u soustružení koná obrobek - rotační pohyb. Vedlejším pohybem je posuv nástroje. Dráhou nástroje je při soustružení válcové plochy šroubovice. Jemné soustružení je charakterizováno použitím vysokých řezných rychlostí, malého posuvu a malého úběru třísky.

Řezná rychlost:

Vždy platí, že $v_c \gg v_f$

$$v_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{10^3} \quad (5-1)$$

$v_c [m \cdot \min^{-1}]$ - řezná rychlost

$d [mm]$ - průměr obrobku

$n [\min^{-1}]$ - otáčky obrobku

$$v_f = f \cdot n \quad (5-2)$$

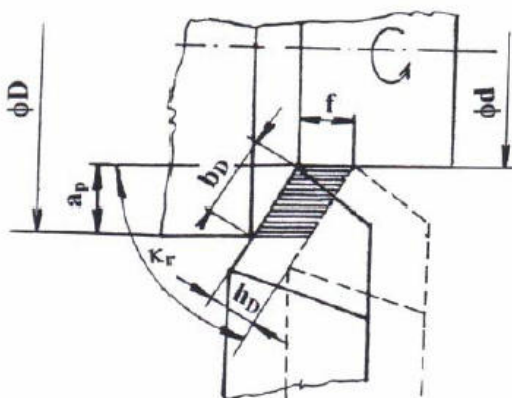
$v_f [mm \cdot \min^{-1}]$ - posuvová rychlost

$f [mm]$ - posuv nástroje za 1 otáčku obrobku

$n [\min^{-1}]$ - počet otáček obrobku za minutu

Průřez třísky:

$$A_D = b_D \cdot h_D = a_p \cdot f [mm^2] \quad (5-3)$$



Obr.5-1 Průřez třísky²

Řezná síla:

Celková síla má 3 složky, řeznou sílu F_c , posuvovou sílu F_f a pasivní sílu F_p

$$F_c = C_{F_c} \cdot a_p^{x_{F_c}} \cdot f^{y_{F_c}} [N] \quad (5-4)$$

$$F_f = C_{F_f} \cdot a_p^{x_{F_f}} \cdot f^{y_{F_f}} [N] \quad (5-5)$$

$$F_p = C_{F_p} \cdot a_p^{x_{F_p}} \cdot f^{y_{F_p}} [N] \quad (5-6)$$

$C_{F_c}, C_{F_f}, C_{F_p} [-]$ - materiálové konstanty

$x_{F_c}, x_{F_f}, x_{F_p} [-]$ - exponenty vlivu a_p

$y_{F_c}, y_{F_f}, y_{F_p} [-]$ - exponenty vlivu f

$a_p [mm]$ - šířka záběru ostří

$f [mm]$ - posuv na otáčku

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2} [N] \quad (5-7)$$

Měrná řezná síla:

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} [MPa] \quad (5-8)$$

Potřebný výkon stroje:

$$P_m = \frac{F_c \cdot v_c}{6 \cdot 10^4 \cdot \eta} [kW] \quad (5-9)$$

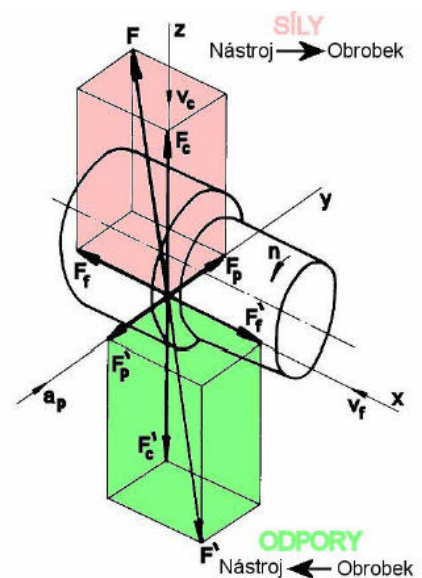
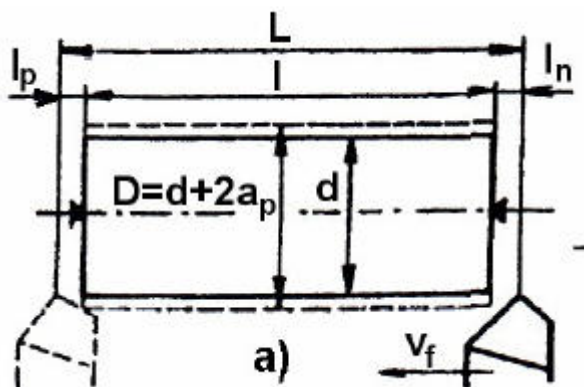
Strojní čas:

$$t_{AS} = \frac{L}{n \cdot f} [\text{min}] \quad (5-10)$$

$L = l + l_n + l_p [mm]$ - dráha nástroje

$n [\text{min}^{-1}]$ - otáčky

$f [mm]$ - posuv na otáčku



5.3 Nástroje pro jemné soustružení

Pro dokončovací soustružení se používají výhradně nástroje s vyměnitelnými břitovými destičkami. Nože z rychlořezných ocelí nejsou použitelné, protože s nimi nejde dosáhnout vysokých řezných rychlostí, kvalitního povrchu a navíc je obrábění realizováno na CNC strojích, kde se tyto nástroje nepoužívají. Břítové destičky mohou být vyrobeny ze slinutých karbidů, nepovlakovaných i povlakovaných, řezné keramiky a ve speciálních případech také ze supertvrdých materiálů - kubický nitrid boru a syntetický diamant.

5.3.1 Slinuté karbidy

Jsou vytvořeny z částech karbidů slinovaných do jednoho celku. Základem je karbid WC (karbid wolframu) v pojivu z Co (kobalt). Mají dobré řezné vlastnosti, vysokou tvrdost a vysokou lomovou houževnatost. Nevýhodou je poměrně malá tepelná stabilita.

Dělí se do tří hlavních skupin, které se liší svým složením a jsou vhodné na různé druhy materiálů. Pro obrábění ocelí se používají karbidy skupiny P; na materiály s drobivou třískou, například litiny, jsou určeny karbidy skupiny K, třída M je univerzální

Jejich vlastnosti se dají vylepšit aplikací povlaků - tenká vrstva/vrstvy jiného odolnějšího materiálu nanesené na povrchu. Používá se TiC, TiN a další podobné sloučeniny. Tato vrstva má oproti základnímu materiálu mnohem lepší odolnost vůči opotřebení a vyšší tvrdost. Tyto vlastnosti jsou mimo jiné dány nepřítomností pojiva, jemnější zrnitosti a minimem strukturních vad.

5.3.2 Řezná keramika

Je definována jako "převážně krystalický materiál, jehož hlavní složku tvoří anorganické látky nekovového charakteru". Největší výhodou je vysoká tvrdost, odolnost vůči vysokým teplotám a chemická stálost. Problémem může být značná křehkost. Nejrozšířenějším materiálem oxidických keramik je umělý korund, Al_2O_3 , další skupinou jsou nitridové keramiky (Si_3N_4) a vyztužené pomocí dalších mikrostruktur.

5.3.3 Polykrystalický diamant, KNB

Nejtvrdší existující materiál. Je vysoce efektivní při obrábění slitin neželezných kovů. Bohužel mezi jeho špatné vlastnosti patří nemožnost obrábění slitin železa, protože uhlík k nim má vysokou afinitu, na vzduchu od teploty 650°C začne grafitizace a je také velmi křehký. KNB má podobné vlastnosti jako diamant, ale je s ním možné obrábět všechny druhy materiálů a je teplotně odolnější.



Obr.5-2 Vyměnitelné břitové destičky z povlakovaného SK⁵



Obr.5-3 Destičky z povlakovaného KNB⁵

5.4 Soustruhy

Dokončovací soustružení je realizováno na CNC soustruzích a obráběcích centrech (číslicově řízené stroje). Díky krokovým motorům a pohonu s plynule měnitelnými otáčkami je možné přesnější nastavení řezných parametrů, navíc mají lepší hodnoty tuhosti v soustavě Stroj - Nástroj - Obrobek, takže dosahujeme výrazně kvalitnějších a přesnějších rozměrů a tvarů než obráběcí stroje klasické konstrukce.



Obr.5-4 CNC soustruh ¹⁰

6 LEŠTĚNÍ

6.1 Princip leštění

Je to metoda s velmi malým úběrem materiálu. Dochází při něm k odstraňování drobných nečistot z povrchu a ke zvyšování jakosti povrchu. Jejím účelem je vylepšení vzhledu povrchu materiálu, ale nedochází k žádnému zlepšení přesnosti tvaru a rozměrů. Leštění se často provádí před dalšími povrchovými úpravami náročnými na kvalitu povrchu, například galvanické pokovování.

Leštění je možné provádět jak strojně, tak i v kusové výrobě ručně. Rozdělujeme ho na hrubovací, kdy je brusivo pevně uchyceno v nástroji a na jemné leštění, kdy je stejně jako u lapování brusivo přiváděno mezi nástroj a obrobek ve formě pasty nebo kapaliny.

6.1.1 Mechanické leštění

Leštění je zde vykonáváno mechanickým působením leštících nástrojů. Nejčastěji to jsou kotouče. Je možné ho provádět ručně tak i na strojích. K leštěnému povrchu je přitlačován rychle se točící kotouč s naneseným brusivem, který součást vyleští až do zrcadlového lesku. Dosahuje se vynikajících hodnot drsnosti povrchu, ale celý proces je časově náročný, takže se dosahuje špatné produktivity.

6.1.2 Chemické leštění

Tato metoda se řadí mezi nekonvenční metody dokončování povrchů. Lesklého a hladkého povrchu se zde dosahuje působením chemických látek na součást. Také je to poměrně nová metoda.

Součást ponoříme do nádrže s chemickým roztokem. Spustí se chemické reakce mezi součástí a roztokem, které způsobí narušení povrchové vrstvy. Protože se vrcholky nerovností narušují snáze a rychleji než celistvý povrch, dochází k jejich odleptání a vyhlazení povrchu.

Tento způsob leštění je rychlý a jednoduchý. Je možné jím dokončovat i tvarově složité součásti, které není možné vyrobit jiným způsobem.

6.1.3 Elektrochemické leštění

Principem je elektrochemický úběr materiálu. Součást se ponoří do elektrolytu, kde se vlivem stejnosměrného proudu rozkládá povrch a vzniká na něm vrstva prvků anodického rozpouštění. Ty se více usazují v prohlubních, na vrcholcích nerovností vzniká pouze tenký film. Proto jimi proudí větší proud (rozložené sloučeniny mají větší odpor), takže rychlost rozpouštění je zde vyšší a vrcholky nerovností se postupně vyrovnávají. Rychlost rozpouštění materiálu také závisí na hustotě proudícího proudu, složení a teplotě elektrolytu a na obráběném materiálu.

Tímto způsobem je možné leštit jakýkoli tvar, nutnou podmínkou je čisté jednofázové složení materiálu. Po dokončení operace se musí povrch opláchnout, protože je znečištěný tenkou vrstvou rozložených sloučenin.

6.2 Leštící nástroje

Používají se leštící kotouče nebo leštící pásy. Kotouče se vyrábějí jako lamelové, vyrobené z bavlny, brousících pláten, plsti..., nebo jako tuhé, které můžou být z kovu, gumy nebo dalších pevných materiálů. Mívají na sobě nalepena zrna brusiva. Obvodová rychlost se pohybuje v hodnotách okolo 25 až 40m/s.

Také je možné použít leštění "nekonečným" pásem. Je to produktivnější a kvalitnější způsob než leštění kotoučem.



Obr 6-1 Bavlněné leštící kotouče ¹¹

Obr 6-2 Sada leštících kotoučů ¹²Obr.6-3 Leštící válec ¹²

6.3 Leštící stroje

Pro strojní leštění se většinou používají standardní lapovací stroje, které jsou konstruovány víceúčelově, aby je bylo možné použít i na leštění, které je prakticky stejnou operací.

Ruční leštění se provádí s klasickými ručními bruskami

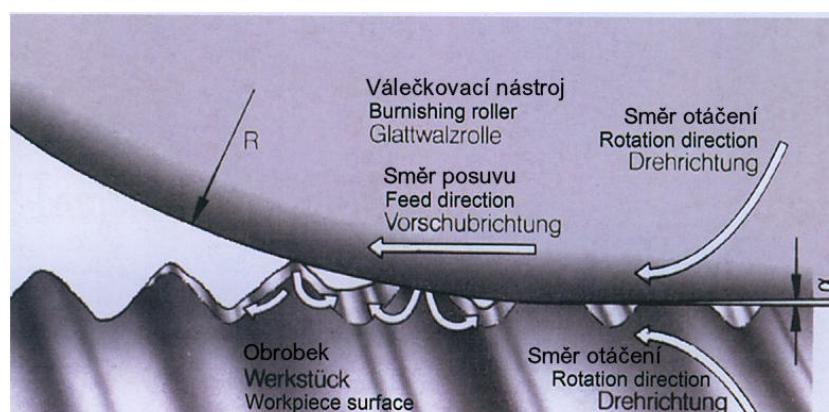
Obr.6-4 Leštící stroj¹³Obr.6-5 Brusky pro ruční leštění¹⁶

7 VÁLEČKOVÁNÍ

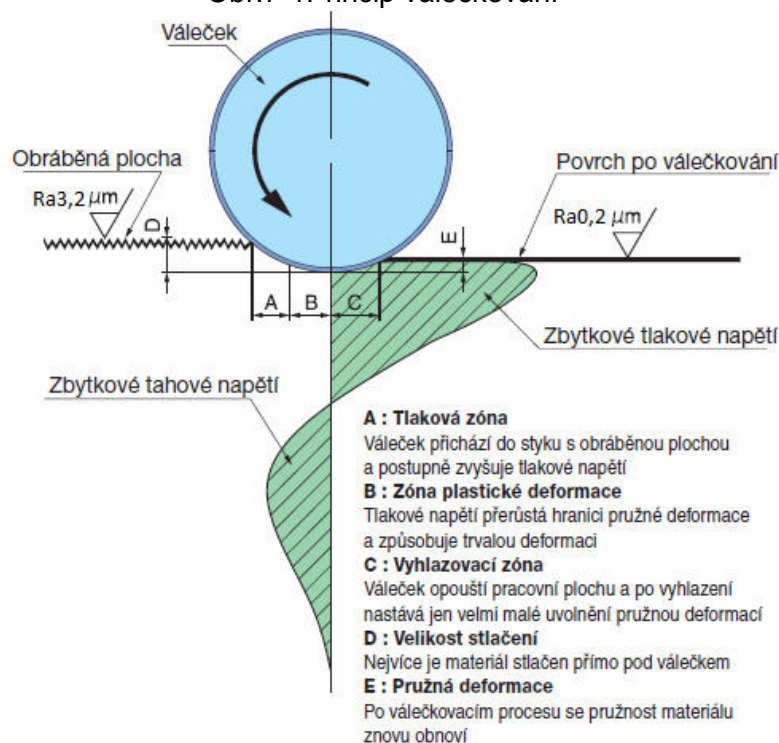
7.1 Princip

Jedná se o beztržkovou metodu dokončování. Je možné ji použít na rotační plochy vnější a vnitřní a také na rovinné plochy. Působením plastických deformací se odstraňují nerovnosti po předchozím obrábění. Má pozitivní vliv na mechanické vlastnosti povrchu. Díky plastické deformaci povrchových vrstev se zlepší mechanické vlastnosti. Tvrdost povrchu se zvýší až o 50-100%, zvyšuje se pevnost, zlepší se odolnost proti otěru, nepříznivá tahová napětí se mění na tlaková, která uzavírají případné mikrotrhliny vzniklé při obrábění a dalším provozu.

Válečkování rozdělujeme na statické a dynamické.



Obr.7-1 Princip válečkování¹⁴



Obr.7-2 Zbytkové deformace materiálu¹⁵

7.1.1 Statické válečkování

Nástroj je k dokončovanému povrchu přitlačován konstantní silou. V místě styku je valivé tření. Tímto způsobem jsou dokončovány součásti z tvárných materiálů; drsnost výchozí součásti musí být menší jak $Ra=3,2\mu m$. Posuv nesmí být stejný jako u předchozího obrábění, jinak by se původní nerovnosti mohly přenést i do dokončeného povrchu a nedosáhli bychom ideálních hodnot drsnosti povrchu. Volí se v hodnotách okolo 0,2-1,0mm/ot. Obvodová rychlost se pohybuje v hodnotách 20-100m/s. Velikost přitlačné síly závisí na materiálu, má hodnotu 500-5000N. Pro zlepšení podmínek valivého tření je vhodné mazání olejem nebo olejovými emulzemi.

Výsledkem je vysoce kvalitní plocha s minimálními nerovnostmi a zpevněným povrchem. Na jedno přejetí je možné dosáhnout drsností $Ra=0,1-0,35\mu m$, u ocelí $Ra=0,15-0,2$. U kalených ocelí jsou výsledky vzhledem k tvrdosti trochu horší, konkrétně $Ra=0,2-0,4$. Rozměrová přesnost je v hodnotách IT6-8, dojde ke stlačení materiálu o 0,01-0,03mm. Dalším průchodem se hodnoty dále zlepší, ale pouze minimálně. Největší vliv na výsledný povrch má velikost přitlaku nástroje k obrobku, původní drsnost povrchu materiálu a tvar mikronerovností, válečkováný materiál, pracovní posuv a válečkovací nástroj.

Tab.7.1 Přidávky a drsnosti ploch ¹

Válečkováná součást		Vnitřní povrchy			Vnější povrchy		
Materiál	Průměr D [mm]	Přídavek [mm]	Ra [μm]		Přídavek [mm]	Ra [μm]	
			Obrobený	Válečkováný		Obrobený	Válečkováný
Materiály s vysokou houževnatostí, $A>18\%$, tvrdost <25 HRC, žíhané oceli, tvárné litiny, slitiny Al, bronzy, mosazi	3÷12	0,010	2,0	0,2	0,010	2,0	0,2
		0,017	3,1		0,015	2,5	
	12÷25	0,017	1,5		0,012	2,0	
		0,040	3,1		0,025	4,5	
	25÷50	0,025	1,5		0,017	2,5	
		0,050	3,1		0,025	4,5	
	50÷165	0,040	1,5		0,025	3,1	
		0,075	5,0		0,050	10,1	
	3÷12	0,010	2,0	0,4	0,008	1,5	0,4
		0,017	2,5		0,012	2,3	
	12÷25	0,017	2,2		0,012	2,5	
		0,025	3,1		0,018	3,5	
Materiály s nízkou houževnatostí, $A<18\%$, tvrdost <40 HRC, zušlechťené oceli, šedé litiny, slitiny Mg, tvrdé slitiny Cu	25÷50	0,025	3,1		0,012	2,5	
		0,040	4,5		0,025	4,5	
	50÷165	0,040	3,0		0,020	3,1	
		0,050	5,0		0,035	5,0	

Tab.7.2 Pracovní podmínky ¹

Válečkový průměr [mm]	Vnější válečkování		Vnitřní válečkování	
	Otáčky [min^{-1}]	Posuv na otáčku [mm]	Otáčky [min^{-1}]	Posuv na otáčku [mm]
5	1500	0,12	1000	0,15
12	1000	0,32	700	0,3
40	600	1,3	400	1,0
65	300	1,5	250	1,8
95	250	1,8	200	2,7
165	200	3,4		
Doporučené otáčky lze v případě speciálních požadavků snížit nebo zvýšit o 50%, posuv na otáčku zvýšit o 30%.				

7.1.2 Dynamické válečkování

Síla nemá konstantní velikost, ale na dokončovanou součást působí silové impulsy. Tyto impulsy jsou vyvozeny kroužky s vačkovými plochami. Hlavní výhodou je vyšší dosažené zpevnění povrchu, dosahované drsnosti jsou naopak horší, pohybují se pouze v hodnotách $R_a=0,2-0,8\mu\text{m}$.

7.2 Nástroje

Nástrojem jsou válečky, které jsou otáčivě uloženy v základním tělese. Válečky jsou vyráběny pro měkké materiály z ocelí, pro tvrdé a kalené materiály z karbidů. Nástroje s válečky jsou používány pro výrobu vnějších a vnitřních válcových a kuželových ploch a na rovinné plochy. Výsledná charakteristika povrchu závisí na průměru - malé válečky způsobují větší hloubku zpevnění, zatímco pokud má větší průměr, získá materiál nižší drsnost.

Další možností je použití kuliček. Kuličky jsou uloženy tak, aby se mohly plynule odvalovat po povrchu součásti. Tyto je možné použít kromě vnějších, vnitřních a rovinných ploch také na dokončování tvarových rotačních ploch. Vzhledem k menší stykové ploše se používají menší přitlačné síly. Jejich nevýhodou je, že snáze kopírují nerovnosti povrchu po předchozím obrábění, které zůstanou i na dokončené součásti. Obvodová rychlost se pohybuje mezi 40-150 m/min, posuv 0,1-0,3mm/ot. obrobku. Mazivem jsou řezné oleje a emulze. Dosahuje se stejných drsností a přesností rozměrů jako u použití válečků.

7.3 Stroje

Válečkování se provádí v klasických a CNC soustruzích, obráběcích centrech, rovinné plochy se válečkují na frézkách a vnitřní také na vrtačkách a vyvrtávačkách. To, že není nutné používat speciální stroj má výhodu v tom, že všechny operace včetně finálních dokončovacích je možné udělat na

jednom stroji při jednom upnutí obrobku. Výrazně to zkracuje potřebné strojní časy a tím pádem i zlevňuje výrobu.

Kromě toho také existují speciální válečkovací stroje, které jsou většinou určené pro průběžné válečkování vnějších povrchů v sériové a hromadné výrobě.



Obr.7-3 Nástroj pro vnější válečkování ¹⁶



Obr.7-4 Specializovaný válečkovací stroj ¹⁵

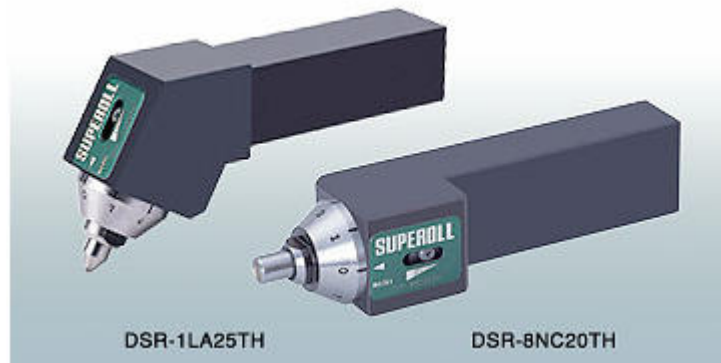
8 HLAZENÍ

8.1 Princip hlazení

Další způsob beztržiskového dokončování ploch. Umožňuje dokončování vnějších i vnitřních rotačních ploch (válcové, kuželové i tvarové). V tomto případě je pro vyhlazení povrchu používán diamantový hrot. Má kuželovou špičku s definovanou geometrií a vlivem konstantní přitlačné síly dochází ke kluznému tření a plastické deformaci povrchové vrstvy. Má stejné výhody jako válečkování, to je zvýšení tvrdosti, zvýšení meze kluzu a meze únavy, vyšší otěruvzdornost a vysoce kvalitní povrch s minimální drsností. Díky použití diamantového hrotu umožňuje dokončovat také kalené a vysoce tvrdé materiály (nejlepší výsledky okolo 50 až 55 HRC). Nevýhodou je kopírování větších nerovností, které je způsobeno malými rozměry kuželu. Dosažená drsnost závisí na obráběném materiálu a řezných podmínkách; dosahujeme $Ra=0,2$ po jednom až třech průchodech.

8.2 Stroje a nástroje

Jako nástroj je použitý diamantový kužel upevněný v držáku, který se upíná do soustruhů. Z toho vyplývá ušetření nákladů na specializovaný stroj.



Obr.8-1 Hlazení ¹⁵



Obr.8-2 Diamantový hrot ¹⁷

9 OTRYSKÁVÁNÍ, KULIČKOVÁNÍ, BALOTINOVÁNÍ

9.1 Princip metody

Jedná se o beztržiskové metody dokončování ploch. Tyto metody jsou založeny na ostřelování povrchu součásti cizími tělesy. Kuličky jsou unášeny proudem stlačeného vzduchu nebo jsou v proudu kapaliny. Výsledná kvalita povrchu závisí hlavně na tvaru, velikosti, hmotnosti a materiálu působících částic a také na jejich rychlosti a směru působení. Dosahovaná drsnost povrchu se pohybuje mezi $Ra=0,8-1,6$. Částice na povrchu svými dopady vytváří drobné prohlubně, způsobují plastickou deformaci povrchové vrstvy a tím zvyšují tvrdost a únavovou životnost.

V průběhu procesu se částice opotřebovávají a ničí a je potřeba je z procesu spolu s odpadem odstranit. K tomu slouží recyklační zařízení, které nasává vzduch spolu s odpadem a znovu použitelnými částicemi do cyklónového odlučovače. Filtr zachycuje odpad a dál do koloběhu pokračují pouze nepoškozené aktivní částice. Odpad je shromažďován zvlášť.

9.1.1 Otryskávání

Používá abrazivní zrna z různých materiálů. Je možná použít ocelovou drť, syntetický korund (Al_2O_3) nebo další podobné materiály (pískování). Částice dopadající vysokou rychlostí na povrch materiálu mají velkou kinetickou energii a v důsledku toho fungují jako brusivo, které zároveň odebírá malou třísku.

9.1.2 Kuličkování

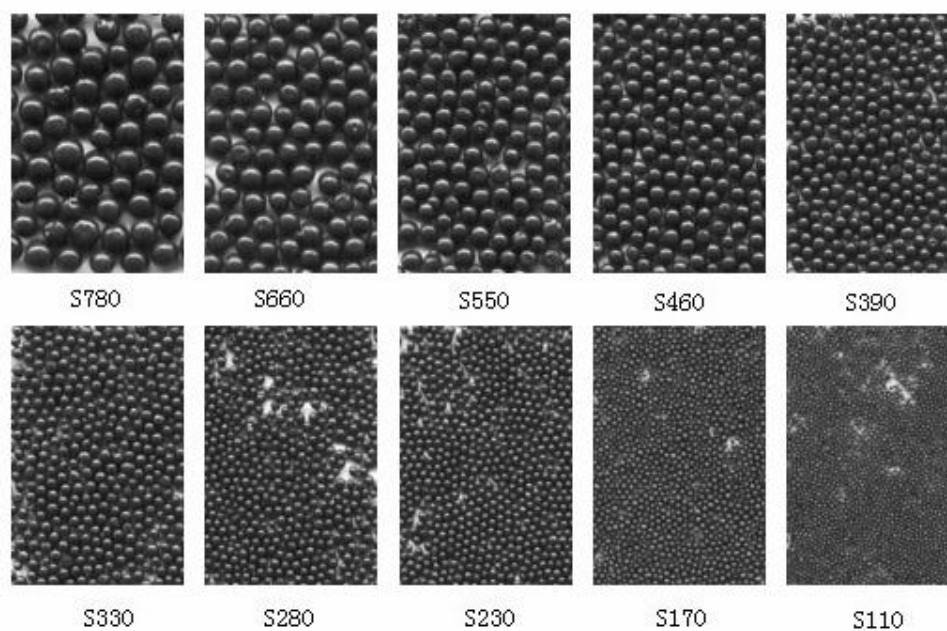
Tato metoda se někdy nazývá brokování. Většinou používá kuličky z oceli nebo z litiny. Mohou být použity měkké, kalené i korozivzdorné oceli. Průměr kuliček se pohybuje mezi 0,3-3mm. Jejich hlavní výhodou je vyšší pevnost a houževnatost a z toho vyplývající vyšší životnost, protože se nárazy tolik neopotřebovávají. Nevýhodou je, že na opracovávané součásti zanechávají stopy otěru; toto může u součástí z neželezných kovů a jejich slitin způsobit následnou korozi.

9.1.3 Balotínování

Používají se skleněné kuličky o průměru 0,03-0,8mm. Hlavní problém vyplývá z charakteru materiálu kuliček - skla, které je křehké; proto se rychle poškozuje a má malou životnost. Výhodou je nezanechávání stop otěru.

9.2 Stroje

Pro všechny 3 metody se používají speciální komory. Pohyb může být řízen ručně nebo automaticky, je možné i CNC řízení.

Obr.9-1 Ocelové kuličky pro kuličkování¹⁸Obr.9-2 Otryskávací stroj¹⁹

10 NEKONVENČNÍ TECHNOLOGIE

10.1 Princip

Nepoužívají standardní řezné nástroje, u kterých můžeme definovat řeznou geometrii. K úběru materiálu nedochází ve formě klasické třísky, ale na materiál působíme tepelně, chemicky, elektricky nebo kombinací těchto metod. Tyto metody se rozvíjí hlavně proto, že vznikají nové materiály, které jdou obrábět pouze obtížně a s velkými problémy, např. superslitiny, karbidy nebo titanové slitiny.

K hlavním výhodám patří nezávislost na mechanických hodnotách daného materiálu; možnost obrábění velmi tvrdých materiálů, protože materiál nástroje nemusí být tvrdší než obráběný. Také je možné jednoduše vyrábět složité tvary včetně vnitřních dutin a tvarových děr v materiálech s vysokými hodnotami mechanických veličin. Stroje jsou řízeny CNC systémy.

10.2 Elektroerozivní obrábění

Úběr materiálu je vyvolán periodickými elektrickými výboji mezi nástrojem a obrobkem. Malé částčky materiálu se odpařují a jsou odplavovány dielektrickou kapalinou. Pro tento účel se používají transformátorové oleje, petrolej nebo deionizovaná destilovaná voda.

Mezi nástrojem a obrobkem je jiskrová mezera o velikosti 0,01-0,5mm. Součást je zapojena jako anoda, nástroj jako katoda; mezi nimi probíhají výboje stejnosměrného proudu s obdélníkovým průběhem. Při každém výboji se vytvoří kráter na obrobku, ale dojde také k odpaření trochy materiálu z nástroje. Odtavený materiál je potom odplaven kapalinou. Nástroj se přiblíží k materiálu, zároveň může konat kmitavý pohyb a celý proces se potom opakuje.

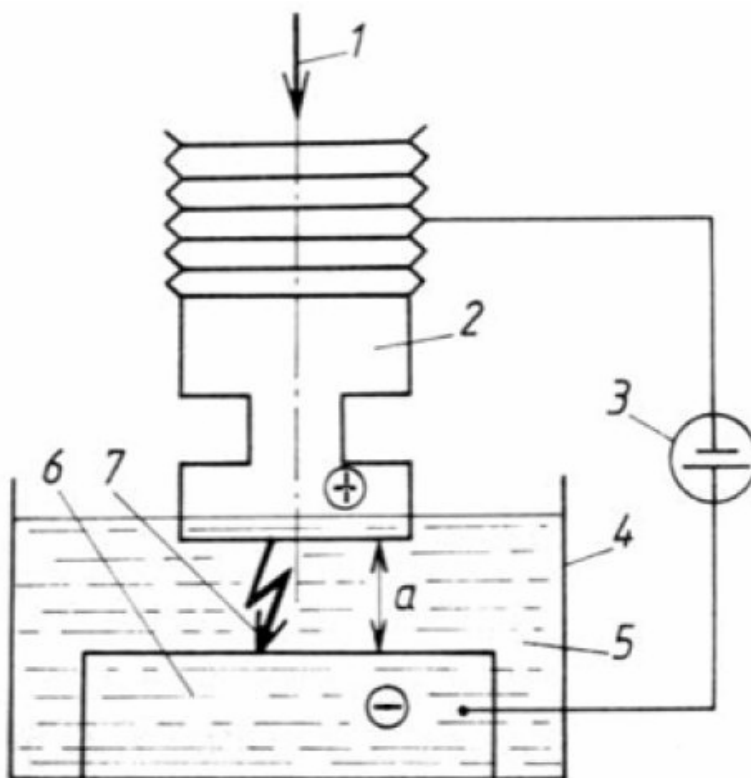
Snahou je dosáhnout jiskrového výboje, který dosahuje teploty až 10 000°C po dobu 0,01-0,1ms. Dosahuje se toho použitím kondenzátoru v obvodu; bez něho často vzniká pouze elektrický oblouk s teplotou 4000°C za 0,1ms - 0,1s.

Modifikací je elektroimpulzivní obrábění; pro modulaci výboje využívá impulzní generátor. U nich nezávisí charakteristika impulsu na době obrábění ani na stavu jiskrové mezery. Dosahuje větších úběrů materiálu, ale za cenu zhoršení kvality povrchu, proto se používá hlavně na hrubování.

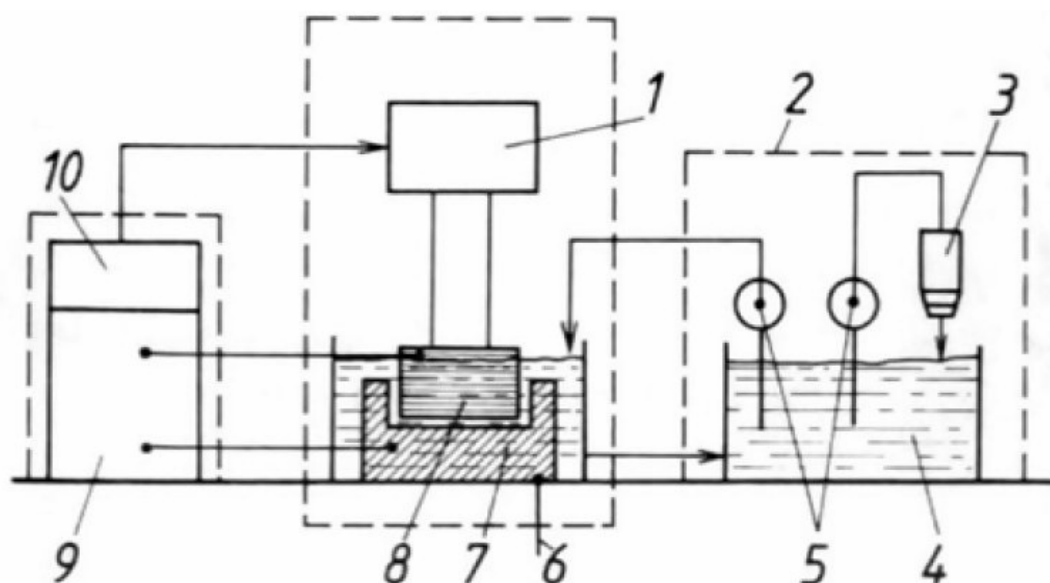
Nástroje mají negativní tvar obráběné plochy nebo při CNC řízení se také používají jednoduché elektrody a celý proces potom připomíná frézování. Její materiál musí mít vysokou elektrickou vodivost, dobrou obrobitelnost a dostatečnou pevnost. Vyrábí se klasickými postupy jako je obrábění, lití nebo slinování. Opatřebením nejvíce ovlivňuje teplota tavení obráběného materiálu. Hodnotí se v rozích (nejdůležitější), na bocích a na konci elektrody.

Tab.10-1 Materiály elektrod a jejich vlastnosti ¹

Materiál	Charakteristika
Grafit	Nejčastěji používaný materiál, je dobře obrobitelný a vykazuje nízké opotřebení. Nevýhodou grafitu je znečišťování hloubicího stroje.
Měď	Má dobrou elektrickou vodivost, vykazuje nízké opotřebení. Měděné elektrody nepracují tak dobře jako elektrody z grafitu nebo mosazi. Jsou vhodné pro obrábění karbidu wolframu. Dosahovaná drsnost povrchu obrobené plochy je lepší než $Ra=0,5 \mu m$.
Měď - wolfram a stříbro - wolfram	Jde o drahé materiály. Používají se pro výrobu elektrod na hluboké drážky. Elektrody jsou vyráběny slinováním wolframu s mědí nebo stříbrem. Po slinutí již nemůže být elektroda tvarována v důsledku křehkosti materiálu.
Měď - grafit	Tento materiál je 1,5 až 2krát dražší než grafit, je vhodný pro obrábění karbidu wolframu.
Mosaz	Relativně levný a snadno obrobitelný materiál, vykazuje však vysoké hodnoty opotřebení.
Wolfram	Pro výrobu malých děr, $D < 0,2 \text{ mm}$.

Obr.10-1 Princip elektroerozivního obrábění ⁵

1-posuv elektrody, 2-elektroda, 3-zdroj, 4-pracovní vana,
5-dielektrikum, 6-obrobek, 7-elektrický výboj

Obr.10-2 Schéma stroje⁵

1-pracovní hlava, 2-filtrační soustava, 3-filtr, 4-dielektrikum,
5-čerpadlo, 6-pracovní stůl, 7-obrobek, 8- elektroda,
9-zdroj proudu, 10-řídící systém

Obr.10-3 Pracovní prostor stroje⁵

ZÁVĚR

Práce obsahuje srovnání technologií pro dokončovací obrábění vnějších válcových ploch. Obsahuje metody starší, nové, konvenční i nekonvenční. Pro srovnání jednotlivých metod je použita hlavně drsnost, jakost povrchu a dosahovaná třída přesnosti IT, u některých metod potom také vzhled povrchu a další pozitivní vlivy.

Na kvalitu dokončeného povrchu má největší vliv zvolená metoda a také předchozí obrábění. Z důvodu existence většího množství dokončovacích operací a jejich odlišného zaměření je nutné vybrat správnou technologii. Většina metod je zaměřena na zpřesňování rozměrů a snížení drsnosti (broušení, lapování), další skupina pouze zlepší vzhled součásti, ale na rozměrovou přesnost nemá vliv (leštění) a metody bez úběru materiálu navíc zvýší tvrdost a pevnost (válečkování).

Proto je nutné, aby konstruktér nebo technolog tyto metody znal a uměl zvolit správnou jak z hlediska funkčních vlastností, vzhledu i podle ekonomického hlediska.

RESUMÉ

Tato bakalářská práce je zaměřena na dokončovací obrábění vnějších rotačních ploch. Obsahuje shrnutí starších i nových metod. Zabývá se vlivem těchto technologií na jakost a vlastnosti povrchu. Vybrat správnou dokončovací technologii může být problém, proto se také věnuje vhodnosti použití, jejich charakteristikami, výhodami a nevýhodami. Věnuje se technologiím pro zlepšení drsnosti a jakosti povrchu, pro vylepšení vzhledu a také pro zlepšení mechanických vlastností.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. HUMÁR, A. Technologie I, Technologie obrábění – 3. část, 2005
2. HUMÁR, A. Technologie I, Technologie obrábění – 1. část, 2005
3. KLOCKE, F., KUCHLE, A. Manufacturing Processes 2: Grinding, Honing, Lapping, Springer 2009, ISBN 354092258X
4. ZEMČÍK, O. Technologická příprava výroby, CERM 2002, ISBN 80 –214–2219 – X
5. *Mmspektrum* [online]. Dostupné z WWW: <www.mmspektrum.com>
6. *Elitalycea* [online]. 2005 [cit. 2010-05-24]. Soustružení. Dostupné z WWW: <<http://www.elitalycea.wz.cz/files/tep/tep17.pdf>>.
7. *PR Hoffman* [online]. Dostupné z : <www.prhoffman.com>
8. *Gontermann-Peipers* [online]. Dostupné z : <www.gontermann-peipers.de>
9. *Super Abrasive India* [online]. Dostupné z : <www.superabraziveindia.com>
10. *FermatMachinery* [online]. Dostupné z WWW: <www.fermatmachinery.com>
11. *Leštění* [online]. Dostupné z WWW: <www.lesteni.cz>
12. *Micronplus* [online]. Dostupné z WWW: <www.micronplus.cz>
13. *Wilhelm Tatje KG* [online]. Dostupné z WWW: <www.tatje.com>
14. *Winter Servis* [online]. Dostupné z WWW: <www.winter-servis.cz>
15. *Sugino* [online]. Dostupné z WWW: <www.sugino.cz>
16. *Yamasa* [online]. Dostupné z WWW: < <http://yamasaltd.en.ecplaza.net/>>
17. *Cogsdil-Nuneaton Limitedl* [online]. Dostupné z WWW: <www.rollerburnishingtool.co.uk>
18. *Sdyida* [online]. Dostupné z WWW: <www.sdyida.cn/english/Structure.asp>
19. *BizTradeMarket* [online]. Dostupné z WWW: <www.biztrademarket.com>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

Symbol/zkratka	Jednotka	Význam
Ra	μm	Drsnost povrchu
SK	-	Slinutý karbid
KNB	-	Kubický nitrid boru
PD	-	Polykrystalický diamant
NC	-	Číslicově řízený stroj
CNC	-	Počítačově řízený stroj
v_c	m/min;m/s	Řezná rychlost
v_w	m/min	Obvodová rychlost obrobku
v_f	m/min	Posuvová rychlost
n	min^{-1}	Otáčky
F_c	N	Řezná rychlost
K_c	MPa	Řezný odpor
A_D	mm^2	Průřez třísky
t_{AS}	min	Strojní čas
a_e	mm	Šířka pracovního záběru
f	mm	Posuv
d_s	mm	Průměr kotouče
L	mm	Délka dráhy nástroje